

学校编码: 10384

分类号_____密级__

学号: 200430011

UDC__

厦门大学

硕 士 学 位 论 文

超声作用于布拉格光纤光栅的特性研究

The investigations on characteristics of fiber Bragg
gratings subjected to ultrasonic waves

斯妙玲

指导教师姓名: 叶陈春 教授

专 业 名 称: 无线电物理

论文提交日期: 2007 年 5 月

论文答辩时间: 2007 年 5 月

学位授予日期: 2007 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2007 年 5 月

厦门大学学位论文原创性声明

兹呈交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版，有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅，有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索，有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

1、保密（ ），在 年解密后适用本授权书。

2、不保密（ ）

（请在以上相应括号内打“√”）

作者签名：

日期： 年 月 日

导师签名：

日期： 年 月 日

摘 要

由于超声作用将导致光纤布拉格光栅 (FBG) 发生微弯曲, 从而对 FBG 的纤芯折射率作出相应的调制, 使得 FBG 的反射谱和透射谱发生显著的变化。利用该特点, 国外研究者已经实现了基于超声调制 FBG 传感器、可调谐反射器、光开关、光纤滤波器等。

首先, 对超声检测中的超声波以及超声换能器进行了简单的介绍, 提出检测应用中超声波的优点, 并介绍了超声波的类型, 同时对超声换能器产生超声波的原理和超声换能器的结构作了介绍。

其次, 从光栅基本理论出发, 得出了超声作用导致光栅横向振动时光栅中存在三种主要的耦合方式, 提出了经过修正之后的耦合模方程, 根据失谐量定义, 从相位匹配条件出发, 定性地分析了光栅横向振动的反射谱特性。另外, 从光栅超晶格理论出发, 本文也简单介绍了纵向振动反射谱特性。

第三, 提出了基于 Newton-Raphson 方法的算法, 对横向振动反射谱特性进行了数值模拟, 这种算法快速稳定并且收敛。同时对数值模拟的反射谱进行了详细的分析。通过对数值模拟过程中选择的耦合模数目和超声强度进行优化分析, 获得的结论是: 如果没特殊要求的话, 多模耦合方程中只需要选择两个模式就可以得到较精确的谱线。

最后, 根据理论分析, 计算了要产生一阶包层模需要的超声波长以及对应的超声换能器频率, 并进行了光纤光栅超声横向振动实验。测量了不同超声功率下 FBG 的反射谱。实验结果与理论基本相吻合。

关键词: 超声, 光纤布拉格光栅 (FBG), Newton-Raphson 方法

Abstract

Ultrasonic waves that impinge on a fiber Bragg grating (FBG) induce periodic microbends of the fiber, which modulate the refractive index and lead to the remarkable changes of optical spectral characteristics of the FBG. Based on such effects of acoustic waves on FBG, several researchers have developed the ultrasonic-optical FBG sensors, acoustic-optics tunable reflectors, optical switching and optical filters.

Firstly, the ultrasonic waves and ultrasonic transducers are introduced. The characteristics and the advantages of ultrasonic waves are presented. Moreover, the principles and structures of ultrasonic transducers are briefly described.

Secondly, based on the fundamental theory of FBG, we show that there are three kinds of coupling mechanisms in the FBG subjected to transverse acoustic waves. The theoretical model for the FBG subjected to transverse acoustic wave is proposed by modifying the multi-mode coupled equations. In terms of phase-matching conditions, the characteristics of reflective spectrum for such a FBG are qualitatively analyzed. In addition, we also describe the optical spectral characteristics of the FBG subjected to longitudinal acoustic waves based on the theory of acousto-optic superlattice modulation.

Thirdly, in order to simulate the optical spectral characteristics of the FBG subjected to acoustic wave, a novel algorithm is proposed based on the Newton-Raphson method. This algorithm is fast and convergent. Using our algorithm, the numerical simulations for the multi-mode coupled equations are performed and the corresponding results are analyzed. Furthermore, the optimization processes for acoustic intensity and the mode numbers of multi-mode coupled equations are performed by numerical methods, respectively. The results show that, in many cases, the two-mode coupled equations will be sufficient to obtain the accurate spectral characteristics of FBG subjected to acoustic waves.

Based on the above theoretical analysis, we have calculated the required

wavelength of acoustic wave and the corresponding frequency of ultrasonic transducer for coupling efficiently LP_{01} with LP_{11} mode. We have also experimentally investigated the characteristics of FBGs subjected to transverse acoustic waves. The reflective spectra of FBGs under different ultrasonic powers have been measured. The experimental results are in good agreement with those by the theoretical analysis.

Keywords: Ultrasonic waves; fiber Bragg gratings (FBGs); Newton-Raphson method

目 录

第一章	绪论	1
1. 1	光纤光栅简介	1
1. 1. 1	光纤光栅的发展背景	1
1. 1. 2	光纤光栅的分类	2
1. 1. 4	光纤布拉格光栅 (FBG) 的基本原理	4
1. 1. 4	光纤光栅的制作	5
1. 1. 5	FBG 的主要特征	7
1. 2	光纤光栅在超声波领域的应用研究	8
1. 2. 1	超声 FBG 传感器	8
1. 2. 2	反射率可调谐 FBG	8
1. 2. 3	光开关器	10
1. 2. 4	光纤滤波器	13
1. 3	论文内容及主要结构	14
第二章	超声原理及超声换能器简介	16
2. 1	超声技术概述	16
2. 2	超声波波型	16
2. 3	超声场以及特征参量	17
2. 3. 1	超声波的频率、周期、波长和传播速度	17
2. 3. 2	声压 p 和介质质点振动速度 v	18
2. 3. 3	平均声能密度 $\overline{P_E}$ 和声强 I	19
2. 4	超声换能器	19
2. 4. 1	压电效应	19
2. 4. 2	活塞声源的纵波声场特性	20
2. 4. 3	超声换能器的种类	23
2. 5	本章小结	25
第三章	超声作用于 FBG 特性的理论研究	26
3. 1	横向振动理论分析	26
3. 2	纵向振动理论分析	32
3. 3	本章小结	33
第四章	快速算法和横向振动特性的数值模拟	34
4. 1	龙格—库塔法和传输矩阵	34
4. 2	基于 Newton-Raphson 方法的快速算法	36
4. 2. 1	数值模拟	36
4. 2. 2	耦合模方程中模式数目的优化	41
4. 2. 3	超声波强度优化	43
4. 3	本章小结	44
第五章	超声作用于 FBG 横向振动实验	45

5. 1 参数分析	45
5. 2 实验结构	45
5. 3 实验结果	48
总结与展望	50
参考文献:	52
致 谢	55

厦门大学博士论文摘要库

Contents

Chapter 1	Introduction.....	1
1.1	Brief introduction to fiber Bragg gratings (FBGs);.....	1
1.1.1	Development of FBGs.....	1
1.1.2	Classification of FBGs.....	2
1.1.3	Principle of FBGs.....	4
1.1.4	FBGs fabrication.....	5
1.1.5	Significant features of FBGs.....	7
1.2	Applications of FBGs in ultrasonic waves.....	8
1.2.1	Ultrasonic FBG sensors.....	8
1.2.2	Reflectivity-tunable FBGs.....	8
1.2.3	Optical switching.....	10
1.2.4	Optical fiber filters.....	13
1.3	About this thesis.....	14
Chapter 2	Ultrasonic waves and ultrasonic transducer.....	16
2.1	Overview of ultrasonic technology.....	16
2.2	Wave profiles of ultrasonic wave.....	16
2.3	Ultrasonic field and the eigenvectors.....	17
2.3.1	The frequency, period, wavelength, and velocity of an ultrasonic wave.....	17
2.3.2	Ultrasonic pressure and vibrating velocity of medium particles.....	18
2.3.3	Averaged ultrasonic density and the ultrasonic intensity.....	19
2.4	Ultrasonic transducers.....	19
2.4.1	Piezoelectric effect	19
2.4.2	Longitudinal wave characteristic of plunger ultrasonic sources.....	20
2.4.3	Categories of ultrasonic transducers.....	23
2.5	Summary.....	25

Chapter 3	Theoretical investigations on characteristics of	
	FBGs subjected to ultrasonic waves.....	26
3.1	Theoretical analysis for transverse vibration.....	26
3.2	Theoretical analysis for longitudinal vibration.....	32
3.3	Summary.....	33
Chapter 4	Fast algorithm and numerical simulations	
	for the characteristics of transverse vibration.....	34
4.1	Runge-Kouta method and transfer matrix method.....	34
4.2	Fast algorithm based on Newton-Raphson method.....	36
4.2.1	Numerical simulations.....	36
4.2.2	Optimization of the mode number involving	
	in the coupled-mode equations.....	41
4.2.3	Optimization of acoustic intensity.....	43
4.3	Summary.....	44
Chapter 5	Experiments for the transverse vibration	
	of a FBG subjected to ultrasonic waves.....	45
5.1	Parameters analysis.....	45
5.2	Experimental setup.....	45
5.3	Experimental results.....	48
	Conclusions and outlook.....	50
	References.....	52
	Acknowledgements.....	55

第一章 绪论

1.1 光纤光栅简介

1.1.1 光纤光栅的发展背景

光纤光栅是近几年发展最为迅速的光纤无源器件之一^[1]。光纤光栅的研究始于1978年,加拿大渥太华通信研究中心的K.O.Hill^[2]等人首次在掺锗石英光纤中发现光纤的光敏性,并采用驻波法制成世界上第一支光纤光栅。但由于当时光纤光栅的写入技术不完善,成栅效率很低,因此并未引起人们的注意,光纤光栅的研究度过了相对沉寂的十年。直到1989年,美国联合技术研究中心的G.Meltz等人用全息曝光法研制成功了光纤光栅^[3],从而在世界范围内掀起了光纤光栅的研究热潮。此后不久又出现了更加简单、有效的相位掩模方法,使光纤光栅的写入技术日臻成熟,极大地推动了光纤光栅技术的发展。

所谓光纤中的光敏性是指光纤受到特定波长的光辐射后,光纤的折射率随着光强的空间分布发生相应的变化,变化的大小与光强成线性关系并可永久地保存下来,这种现象也称为光致折射率变化效应。如果两束相干的激光从侧面辐照掺锗光纤,可以使光纤纤芯的折射率在光纤长度方向上受到周期调制,从而形成光纤光栅,或称为光纤布拉格光栅。其实质是在纤芯内形成了一个窄带的滤波器或反射镜,利用这些特性可构成许多性能独特的光纤无源器件。

目前,人们对光纤光栅的研究已取得飞跃进展,光纤掺杂元素从单纯的锗(Ge)元素发展到磷(P)、硼(B)、铒(Er)、镱(Yb)、铥(Tm)等元素;所用成栅光源也从488nm的可见光变化到193nm/248nm的紫外光,对长周期光纤光栅也可采用红外光源等;光纤光栅的制作方法发展到逐点写入法、全息曝光法、相位掩模法等;由于光纤光栅具有许多独特的优点,人们将其用于光通信的同时也致力于将其应用于各种物理量的传感^[4]。光纤光栅的出现,深刻地影响着光纤信息传输的设计及光子器件的研制,它使许多复杂的全光纤通信、多点分布式传感及其网络监测成为可能,极大地拓宽了光纤技术的应用范围。20多年来,光纤光栅的应用已遍及光纤通信、光纤激光器、光纤器件以及光纤

传感器等领域，并已取得了很大的进展。随着光纤光栅制造技术的不断完善，应用成果的日益增多，使得光纤光栅成为目前最有发展前途、最具有代表性的光纤无源器件之一^[5]。

1. 1. 2 光纤光栅的分类

光纤光栅可分为均匀周期光纤光栅和非均匀周期光纤光栅。均匀周期光纤光栅一般可以分为反射型的布拉格光纤光栅 (Fiber Bragg grating, FBG) 和透射型的长周期光纤光栅。FBG 的周期为数百纳米，又称短周期光纤光栅。长周期光纤光栅的周期为几十到几百微米。非均匀周期光栅主要包括啁啾光纤光栅、相移光纤光栅及取样光纤光栅等。下面简单介绍一下几种常用的光纤光栅^[6-7]：

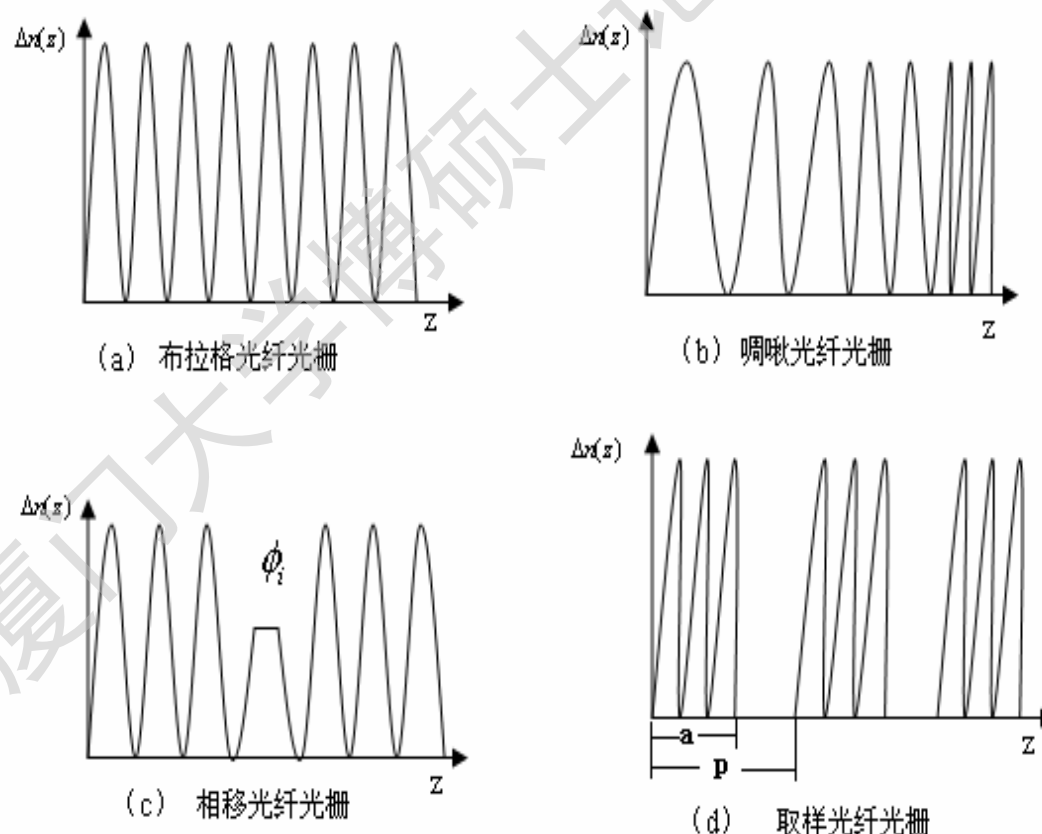


图 1.1 各种光纤光栅的折射率调制图

(1) 布拉格光纤光栅 (FBG)

如图 1.1(a) 所示, 对均匀周期的 FBG, 光栅周期小于 $1\mu\text{m}$, 纤芯折射率变化为:

$$\Delta n(z) = \overline{\delta_n} \left[1 + v \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z\right) \right] \quad (1-1)$$

式中: $\overline{\delta_n}$ ——纤芯折射率的平均增加值

v ——折射率调制系数 ($0 \leq v \leq 1$)

Λ ——均匀光栅的周期

z ——光纤光栅轴向方向的位置坐标

FBG 是一种性能优异的反射滤波器, 具有很高的反射率, 而且反射带宽和反射率可以根据改变写入条件来灵活控制, 这种光栅在光纤通信和光纤传感领域得到重要应用。

(2) 啁啾光纤布拉格光栅 (Chirped FBG)

一般的啁啾光栅折射率调制幅度不变, 其周期沿光栅轴向逐渐变化, 如图 1.1(b) 所示。最常用的啁啾光纤光栅是线性啁啾光纤光栅, 其折射率变化为:

$$\Delta n(z) = \overline{\delta_n} \left[1 + v \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda_0} z + \phi_z\right) \right] \quad (1-2)$$

式中: Λ_0 ——光栅中点的周期

ϕ_z ——光栅周期变化产生的相移, 描述光栅啁啾

由于不同周期对应不同的反射波长, 因此线性啁啾光纤光栅可以形成很宽的反射带宽和稳定的色散, 广泛应用于波分复用系统和色散补偿方面。

(3) 相移光纤布拉格光栅 (Phase shifted FBG)

光纤光栅中的折射率变化出现不连续时 (相位发生突变) 就形成了相移光纤光栅, 不连续点就是所谓的相移点, 如图 1.1(c) 所示。它可在反射谱的阻带中打开线宽极窄的一个或多个透射窗口。使得光栅对某一个或多个波长具有更高的选择度, 而且窗口位置可以随相移量的大小发生改变。因此可以根据不同的需要设计具有不同反射谱的相移光栅, 可应用于滤波, 波分复用, 单频光纤激光器以及掺铒光纤放大器增益平坦等研究。

(4) 取样/超结构光纤光栅 (Sampled/Superstructure FBG)

取样光纤光栅是对布拉格光纤光栅的折射率调制外加一个周期性采样函数调制而成的光栅，折射率调制如图 1.1 (d) 所示，其折射率变化为：

$$\Delta n(z) = \left[\text{comb}\left(\frac{z}{p}\right) * \text{rect}\left(\frac{z}{a}\right) \right] \cdot \left\{ \bar{\delta}_n \left[1 + v \cos\left(\frac{2\pi z}{\Lambda_0}\right) \right] \cdot \text{rect}\left(\frac{z}{L}\right) \right\} \quad (1-3)$$

式中： a ——每一段布拉格光栅曝光长度

P ——取样周期

L ——取样光栅总长度

利用取样光栅可形成一系列窄带反射峰，因此可用来作梳状滤波器，这是它最突出的应用。

(5) 长周期光纤光栅 (Long-period fiber gratings)

长周期光纤光栅的周期远远大于一般的光纤光栅，可达到几十到几百微米之间。对于折射率均匀调制的长周期光纤光栅来说，其纤芯折射率变化为：

$$\Delta n(z) = \bar{\delta}_n \left[1 + v \cos\left(\frac{2\pi z}{\Lambda}\right) \right] \quad (1-4)$$

可以看出，与布拉格光纤光栅的折射率变化是一样的，但它的工作原理不同于布拉格光纤光栅，它是将正向传播的导波模耦合到包层模而损耗掉，是一种透射型光栅，由于它的后向反射很小，特别适合制作掺铒光纤放大器 (Erbium-doped Optical Fiber Amplifier, EDFA) 的增益平坦滤波器。

1. 1. 4 光纤布拉格光栅 (FBG) 的基本原理

光纤的材料为石英，由纤芯和包层组成，通过对纤芯掺杂（通常是掺锗），使纤芯折射率 n_1 比包层折射率 n_2 大，从而形成波导，光就可以在纤芯中传播。纤芯材料具有光敏特性，即外界入射光子与其相互作用可引起纤芯折射率的永久性变化。当芯层折射率受外界入射光子周期调制后，就形成了布拉格光栅。布拉格光栅会对入射的宽带光进行选择性的反射，反射回来的窄带光的中心波长与纤芯折射率调制相位相匹配（带宽通常为 $0.1 \sim 0.5 \text{nm}$ ）。这样，光纤光栅就起到了光波长可选择的反射镜作用。所谓相位匹配是指布拉格波长决定于折射率调制的空间周期 Λ ，用数学公式表示如下^[8]：

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (1-5)$$

λ_B 是光纤光栅的布拉格波长， n_{eff} 是光纤纤芯的有效折射率， Λ 是光纤光栅的周期。

1. 1. 4 光纤光栅的制作

早在 1978 年，Hill 等人在实验室中用 488nm 氩离子激光在掺锗光纤中形成驻波，使其纤芯折射率沿轴向产生了与光强相对应的变化，制备 488nm 的 Bragg 光栅，这种光栅称为“Hill”光栅。由于这种光栅成栅条件苛刻，成品率低，且只能制作对应波长的光栅，使用受到限制，因此并未受到人们的广泛关注。1989 年，G.Meltz 等人发现利用两束紫外相干激光束可以直接从光纤侧面写入 Bragg 光栅，这种外部写入法克服了“Hill 光栅”的缺点，提高了写入效率，从此加速了对光栅的研究，目前已发展了许多制作光栅的方法。

目前光纤光栅的制作方法一般可以分为双光束干涉法^[3]（又称全息曝光法）、相位掩模法^[9]、逐点写入法^[10]等

（1）全息曝光法

1989 年，美国的 G.Meltz 等人^[3]首次用紫外光横向全息技术制成 FBG，之后带来 FBG 的一系列突破。如图所示，紫外光（UV 光）被分成两束后沿两条路径传播后重新以夹角 θ 相交形成干涉图案从而能在光敏光纤的纤芯上刻写光栅。

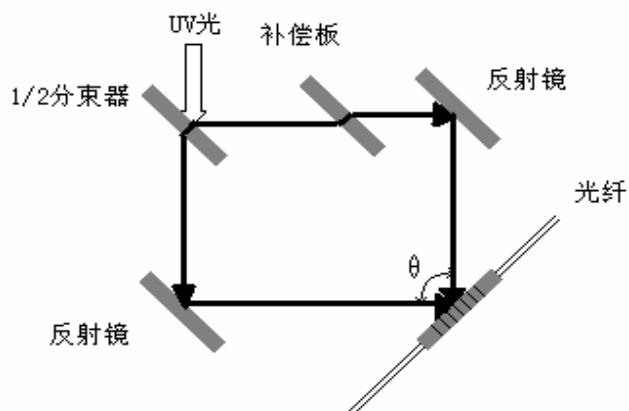


图 1.2 全息曝光法

通过改变入射光的波长、两干涉光束的夹角 θ 或旋转光纤放置的位置均

可以改变 FBG 的周期 Λ ，从而控制 FBG 的反射波长 λ_B 、折射率调制深度 δ_n 和反射率 R 。但该方法对光源的空间相关性和时间相干性要求很高，对光路调整有严格的限制，在曝光时间内必须抑制各种环境因素对光路的干扰。如利用高峰值功率的紫外脉冲激光器，能在几个脉冲下制成 FBG，则对激光器和环境的要求大大降低，对制作大批量 FBG 有重要意义。

(2) 相位掩模法

FBG 制作技术的一个重要进展是在 1993 年 Hill^[9]等人利用相位掩模照射方法代替全息曝光法对光纤进行直接刻制，如图所示，将光敏光纤置于相位掩模板的一侧，使其轴向与掩模板的周期条纹垂直，且紧靠掩模板。UV 光从另一端垂直入射，经掩模衍射后产生的 0 级衍射光受到抑制， ± 1 级衍射光在纤芯中干涉，诱发光纤中折射率的周期性分布，即形成 Bragg 光栅。形成的光栅周期是掩模板周期的一半。

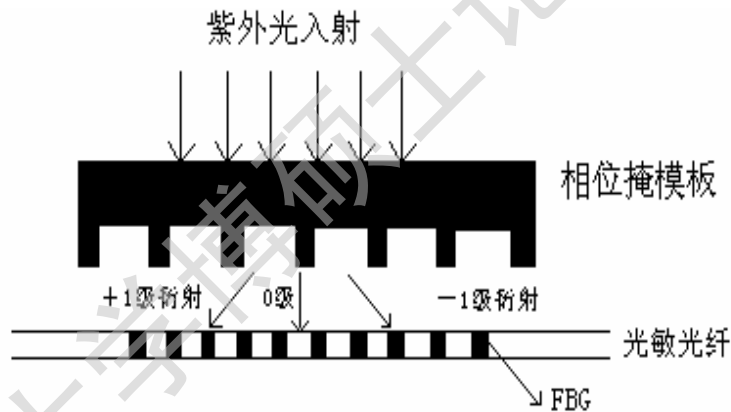


图 1.3 相位掩模法

相位掩模法具有稳定、重复性好等优点，大大减少了制作 FBG 时的复杂性和成本，如采用脉冲激光器更可大大缩短曝光时间，降低了对光源的时间和空间相干性的要求，可高效率地制得各种要求的 FBG。如把相位掩模板和光纤成一定角度放置，可以制成啁啾光栅。

(3) 逐点写入法^[10]

逐点写入法是一种利用聚焦于光纤纤芯的紫外光束对沿轴向移动的光纤逐点曝光的 FBG 非相干技术。通过控制移动光纤的步进电机速度，曝光狭缝的宽度和写入激光强度可制成周期、布拉格波长和反射率不同的 FBG 或同一光纤

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库